DOI:10.11931/guihaia.gxzw201803041

桂林岩溶试验场植被水文过程总有机碳通量垂直变化特征

邓 艳[1,2]，蒋忠诚[2*]，郭益铭[1]，徐 烨[2]，岳祥飞[2]

(1.中国地质大学(武汉),环境学院，武汉 430074；2.中国地质科学院岩溶地质研究所，国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室，桂林 541004)

摘 要：该文以广西桂林岩溶石山区的两种典型植被(香椿林和云实灌丛)为例，利用野外长期定位监测降雨、穿透雨、树干径流、钻孔和表层岩溶水中 TOC 的变化特征，探讨不同植被林冠层 TOC 浓度和通量的年变化特征。结果表明:在降雨通过大气-植被-土壤/岩石的过程，TOC 浓度变化趋势为：树干径流>穿透雨>钻孔水>泉水>大气降雨；穿透雨和树干流中 TOC 浓度的呈现为雨季大旱季小的趋势，钻孔水和泉水的 TOC 浓度月变化则相对稳定；TOC 浓度的增幅不同，穿透雨和树干径流 TOC 浓度的平均增量和变化幅度比钻孔水和泉水的大；香椿林树干径流 TOC 浓度与树干径流量呈负相关关系；TOC 月平均通量为:云实穿透雨>香椿穿透雨>降雨>泉水>香椿树干径流>云实树干径流；云实灌丛林下降雨（204.86 kg·hm^{-2}）的 TOC 通量是香椿林（153.48 kg·hm^{-2}）的 1.3 倍；观测期间,大气降雨输入的 TOC 通量为 63.06 kg·hm^{-2},表层岩溶泉水输出为 48.29 kg·hm^{-2},TOC 输入输出之差为 14.77 kg·hm^{-2},系统 TOC 为正平衡；降雨进入植被内部后时，植被林冠层作为“TOC 活库”具有增加 TOC 通量的“源”作用，而表层岩溶带的土壤/岩石系统作为“TOC 死库”具有吸收、过滤和固定 TOC 的“汇”作用。

关键词： 总有机碳，通量，大气-植被-土壤/岩石系统，岩溶石区，水文过程

The variation of total organic carbon flux in forest hydrological processes in karst experimental site, Guilin

DENG Yan[1,2], JIANG Zhong-cheng[2*], GUO Yi-ming[1], XU Ye[2], YUE Xiang-fei[2]

(1. *China University of Geosciences (Wuhan)*, Wuhan 430074, China; 2. *Institute of Karst Geology,CAGS, Key laboratory of Karst ecosystem and rocky desertification treatment*, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to reveal the annual variation characteristics of TOC concentration and flux in different vegetation canopy, total organic carbon concentration (TOC) and its flux in precipitation, throughfall, stemflow, borehole water and epikarst spring water were monitored in two typical vegetation (*Toona sinensis* and *Caesalpinia decapetala*) in karst rocky mountain area, Guilin Guangxi. The results indicated that: in the process of rainfall through the atmosphere-vegetation-soil/rock profile, the variation trend of TOC concentration is, stemflow>throughfall>borehole water>epikarst spring water>rainfall. The TOC concentration in throughfall and stemflow is bigger in rainy season and smaller in drought season. The monthly TOC concentration in borehole water and epikarst spring water is relatively stable. The increase of

基金项目：国家重点研发计划课题（2016YFC0502506）；基本科研业务费专项经费（JYYWF20182003）[Supported by the National Key Research and Developed (2016YFC0502506); China Geological Survey Research Fund (JYYWF20182003)]。

作者简介：邓艳（1978-），女(汉族)，广西贵港人，硕士，副研究员，主要从事岩溶生态水文和生态恢复研究,(E-mail)dydesk@karst.ac.cn

通讯作者:蒋忠诚，博士，研究员，主要从事岩溶环境学研究，(E-mail)zhjiang@karst.ac.cn

TOC concentration is different, which average increment and amplitude of TOC concentration in

throughfall and stemflow are larger than that in borehole water and spring water.The TOC concentration of stemflow was negatively correlated with stemflow water quantity in *Toona sinensis* forest. TOC average monthly flux is, throughfall in *Caesalpinia decapetala* > throughfall in *Toona sinensis* > precipitation> spring >stemflow in *Toona sinensis* > stemflow in *Caesalpinia decapetala*. The TOC flux under shrub rain（204.86 kg·hm^{-2}）was 1.3 times higher than that in *Toona sinensis*（153.48 kg·hm^{-2}）The TOC flux from rainfall input is 63.06 kg·hm^{-2}, with 48.29 kg·hm^{-2} TOC flux from epikarst spring output . The TOC difference between input and output is 14.77 kg·hm^{-2}, which indicate that TOC in system is positive balance. When precipitation enters vegetation, vegetation canopy, as "TOC live reservoir", increase TOC flux and was a carbon "source", however, soil-rock system in epikarst zone, as "TOC dead reservoir", was carbon "sink" with absorption, filtration and fixing of TOC.
Key words: total organic carbon, flux, atmosphere-vegetation-soil/rock system, karst rocky mountain area, hydrological processes

西南岩溶区由于其碳酸盐岩出露，溶蚀作用强烈，裂隙管道高度发育，土壤浅薄等特点，形成了岩溶区特有的地表、地下双层空间结构体系，独特的水土资源分布格局使得西南岩溶区的生态环境问题十分突出。总有机碳(total organic carbon, TOC)指在水中以溶解或悬浮形态存在的全部有机碳，包括可溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)（Greenberg，1992），通常可溶性有机碳占总有机碳的 90%以上（Mattsson et al, 2003; Kortelainen et al, 2006）。TOC 是全球碳循环中重要的碳组成部分，是水体中微生物的能量来源(Jansson et al, 2000)，因此 TOC 的研究对水生系统的碳通量分析和全球碳循环研究起着重要作用。

近几十年全球地下水TOC输出表现出明显的增加趋势(Freeman et al, 2001; Erlandsson et al, 2008)。由陆地生态系统通过河流向海洋输送的有机碳来源主要有：(1)气态和颗粒态的干沉降（Wilcke et al, 2001）；(2)植被，包括凋落物直接输入以及活植物体和凋落物的淋溶输入；(3)土壤，主要来自微生物代谢、根分泌物以及土壤有机物的淋溶和侵蚀（Hope et al, 1994）。(4）陆地水生生态系统中水生植物通过消耗水体中溶解态的无机碳（DIC）形成不同形式的有机碳（POC和DOC）(张春来等，2013)。国内外学者对温带和热带森林的大气降水、穿透雨、树干流、土壤溶液和溪流水的TOC和DOC进行了研究(Currie et al, 1996; Inagaki et al, 1995; McDowell et al, 1998)。杨丽丽等（2014）研究表明林外降水携带的TOC 输入通量在林地TOC 输入中占有重要地位，林冠的TOC 淋洗作用使TOC 通量增加，而土壤会显著减少TOC输出通量。广西官村地下河研究表明（王巧莲等，2016）水体中TOC和DOC含量波动较快，DOC的昼夜变化可能受生物代谢活动控制。降雨、流量和浊度对岩溶地下河TOC输出有正向促进作用，而气温和pH 对岩溶地下河TOC 有负向的影响（王巧莲等，2016)。此外，TOC 对湖泊、河流等淡水水域的食物链贡献较大,在物质元素循环中起着重要的作用。由腐殖酸和棕黄酸等有机酸组成的DOC在中和阳离子、重金属离子的分解、矿物的风化以及酸性离子的解吸等方面都具有不可低估的作用(Liechty et al, 1995)。DOC 还与Al、Hg等金属元素的迁移有关(Driscoll et al, 1995)。然而，很少涉及西南岩溶石山地区大气-植被-土壤/岩石系统的TOC动态特征，且降水经过植被生态系统-表层岩溶带的碳通量仍然不清楚。

因此，本文以广西桂林岩溶石山区的香椿林和云实灌丛为研究对象，利用野外长期定位监测穿透雨、树干径流、钻孔和表层岩溶水中TOC的变化特征，探讨不同植被林冠层TOC浓度

和通量的年变化特征，为西南岩溶石山区植被碳和养分平衡等生物地球化学循环的精细刻画和定量评价提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于桂林市区的东南郊约 8km 的丫吉村附近（25°10′ N，110 °15′ E)，在该村东南约 1 km 处峰丛洼地与桂林峰林平原的交界地带，丫吉试验场自成一个岩溶水文地质系统。研究区位于亚热带季风气候区，降雨季节分配不均匀，夏季盛行东亚夏季风，冬季降雨主要受内陆或局地蒸发和冬季风影响。根据桂林市气象站 1951-2012 年观测资料，该区多年平均年降雨量为 1 886 mm，雨季和旱季分明，4～8 月为雨季，其降雨量占年降雨量的 70%(陈国富等, 2013)，从 9 月到次年 3 月为旱季。该区多年平均气温为 18.9℃。实验区内岩性单一，主要出露上泥盆统融县组灰岩（D_3r）（姜光辉和张强，2011），成分为浅灰至灰白色纯中厚层状亮晶颗粒灰岩，结构致密，其孔隙度约为 0.12%-3.29%，平均值为 0.68%。土壤浅薄且分布不连续，主要为裂隙土，坡地土壤浅薄，厚度在 0-1 m 之间，土壤覆盖率约为 30%，岩石裸露率高。区内岩溶发育，其含水介质为裂隙-管道型(常勇等，2012)，其中，S31 表层岩溶泉域为试验场最主要的子流域，示踪实验表明 S31 泉域的补给区由三个小型的峰丛洼地组成，流域面积约 1 km^2(常勇等，2012；袁道先等，1996)，以管道流为主，与裂隙流的扩散相组合，S31 泉对降雨反应灵敏，流量变化为 0.1-7000 $L·s^{-1}$。

20 世纪 80 年代以来研究区内植被遭到大量破坏，直至试验场建立后植被得以保护，目前整个场区云实（*Caesalpinia decapetala*）灌丛占 70%左右，稀疏香椿林(*Toona sinensis*)覆盖率为 30%左右，具体的实验样地概况见表 1。本文选择了具有代表性的香椿林和云实灌丛，各建立了一个面积为 30 m×30 m 和 20 m×20 m 的样地。香椿人工林样地林下的灌木和草本数量较少，香椿林林龄约为 15 年，林冠郁闭度为 0.4，乔木平均胸径为 25.33 cm，乔木平均树高为 7 m，平均冠幅为 5 m，灌木层主要有黄荆（*Vitex negundo*）和龙须藤（*Bauhinia championii* (Benth.) Benth.）等，灌木层盖度为 65%，草本主要有肾蕨(*Nephrolepis auriculata*（L）Trimen)等，草木层盖度为 20%。在云实灌丛样地中，样地冠层平均高度为 1.5 m, 平均冠幅为 3.5 m，灌木层盖度为 85%，主要物种为云实、黄荆、檵木（*Loropetalum chinnensis*）等，林下的草本数量较多，草木层盖度为 30%，主要的物种有五节芒（*Miscanthus floridulu* (Labnll.)Warb）和肾蕨等。

表 1　样地基本概况

Table 1　The basic characteristics of study sites

项目 Item	岩性 Rock	土壤 Soil	海拔 (m)Altitude	坡位 Slope	坡向 Aspect	样地内钻孔编号 Borehole number in sample plot
香椿林 Forest of *Toona sinensis* (TS)	灰岩 Limestone	棕色石灰土 Brown limestone soil	522	中坡 Middle slope	SE70°	CF18
云实灌丛 Shrubs of *Caesalpinia decapetala* (CD)	白云岩 Dolomite	棕色石灰土 Brown limestone soil	459	中下坡 Middle and lower slope	北 North	CF16

2 研究方法

2.1 样品采集

实验时间为2015年5月至2016年4月，每场降雨后，将收集的大气降雨、穿透雨、树干径流、钻孔水和表层岩溶水水样存储在冰柜中。在监测期内共收集了42次降雨事件的水样。

为收集和监测大气降雨，在据研究区8 km的桂林市内开阔处放置一个计量精度为1mm的翻斗式雨量计，测定大气降雨量及降雨过程。同时布设了3个内径20cm 的自制雨量筒，每场降雨后收集3个雨量筒的水样形成混合样，作为该场降雨的水样。

为收集和测定穿透雨，按照机械布点方法，在香椿林内分两列设置（每列8个，共16个）穿透雨收集装置。在云实灌丛下自基径处向东、南、西、北 4 个方向延伸，距离主干的辐射距离分别为5、10、15、20 cm自布置16个塑料桶。每次降雨后使用100 mL标准量筒测量收集到的穿透雨量（mL），穿透雨量和水样采用16个收集装置的均值。

为收集和测定树干径流，在香椿林中选择标准木共3株，将直径为2 cm 的聚乙烯塑料管剖开，从距地面1 m 开始蛇形缠绕树干一周半(用刀将缠绕部分的树皮稍微刮平)，用图钉将塑料管固定在树干上，并用玻璃胶对接缝处进行密封，在塑料管下端接一个15 L 的塑料桶，每次降雨后用量筒测量桶内水量。选择2株标准灌木，用直径为2 cm 的聚乙烯塑料管剖开，在灌木10厘米处绕着基部打成领带状，并用图钉固定，并涂抹密封胶，防止雨水外泄。在塑料管下端接一个15 L的塑料桶，每次降雨后用量筒测量桶内水量并收集树干径流水样。

为采集钻孔水和表层岩溶泉水，在观测期间，测量穿透雨和树干径流后同时收集钻孔水和表层岩溶水。在S31号表层岩溶泉安置了CTDP300多参数自动记录仪(由澳大利亚Greenspan公司生产),对系统的5个参数(降雨量、水位、水温、pH和电导率)进行监测，数据采集间隔设定为15分钟。

2.2 化学分析

在水样野外用定性滤纸过滤水样后，在中国地质科学院岩溶地质研究所使用Multi N/C3100 多功能碳氮分析仪（德国耶拿分析仪器股份公司，Analytik Jena AG）测定总有机碳(TOC) 浓度，测量精度为0.1%-5%。

2.3 数据分析

某类水样的TOC 浓度平均值是各降雨事件中相应水量的加权计算值:

$$C = \sum_{1}^{n} C_i \bullet P_i / \sum_{1}^{n} P_i \qquad (1)$$

式中，C为某类水样(林外降水、穿透水、树干茎流)的TOC平均浓度(mg·L^{-1})，Ci为单次降雨后测定的TOC 浓度(mg·L^{-1})，Pi为单次降雨的某类水的水量(mm)，P为某类水的总量(mm)，n 为测定的降水次数。林下降水等于穿透水和树干茎流的水量之和，其TOC浓度平均值是单独测定的穿透水与树干茎流的TOC浓度的水量加权平均值。

本文将岩溶生态系统复杂结构简化为两个作用层，即林冠层(包括林冠层和灌草层)和土壤/岩石层（枯落物层和土壤/岩石层），降雨通过各作用层时的TOC 通量为:

$$F = C \bullet P / 100 \qquad (2)$$

式中，F为通过某作用层的TOC通量(kg·hm^{-2})，C为TOC 的平均浓度(mg·L^{-1})，P为通过各作用层的总水量(mm)。

依据公式(3)计算通过某作用层的TOC通量(Fi)相对上作用层输入的TOC 通量(Fj)的变

化(ΔF):

$$\Delta F = F_i - F_j \quad (3)$$

3 结果和分析

3.1 降雨特征分析

试验期间（2015 年 5 月 1 日—2016 年 4 月 30 日）总降雨量为 3121.2 mm，试验区降雨以短时阵雨为主，4 月开始进入雨季，主要是以<10 mm 以下小降雨事件为主（图 1），5 月雨量、雨强及降雨历时达到峰值，降雨次数最多（22 天），<10mm 以下小降雨事件有 12 天，大暴雨事件有 2 天；6、7 和 8 月降雨次数有所减少，降雨量和雨强也减小。从雨量来看，每天降雨量<10，10～25、25～50、50～100、100～250 和＞250 mm 六个雨量级的降雨量分别为 418.8、541.2、830.8、922.2、408.2、0 mm，分别占降雨总量的 13.42%、17.34%、26.62%、29.55%、13.08%、0（表 2）。从降雨量级的分布来看，日降雨量为＜10 mm 的小雨天数占总降雨天数的 63.16%，而其降雨量仅占总降雨量的 13.42%，对总降雨量的影响较小。日降雨量 50～100 的暴雨次数占总降雨次数的 7.37%，而其降雨量却占总降雨量的 29.55%，表明其对总降雨的影响较大。日降雨量最小值为 0.2 mm，而累积有 3 天大暴雨天气（2015 年 5 月 15 日、2015 年 5 月 20 日、2015 年 6 月 13 日降雨分别为 169.4 mm、107.2 mm 和 131.6 mm），无特大暴雨天气。

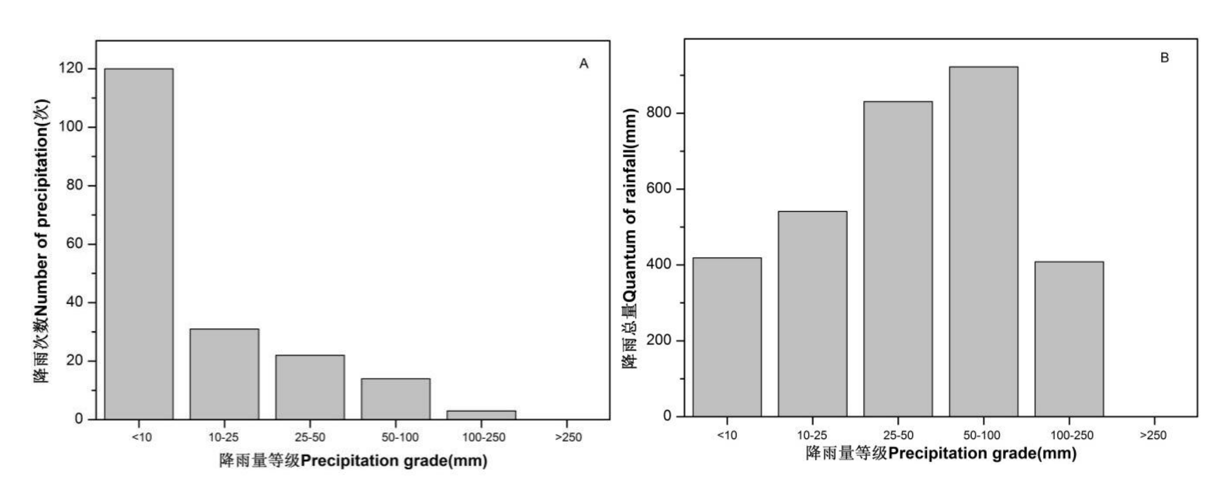


图1　试验期间的降雨频次（A）和各雨量级降雨量（B）

Fig.1 The number of rainfall event (A) and the gross rainfall in different grade in sample time (B)

表 2 降雨特征

Tab 2. Rainfall characteristics

项目 Items	降雨量级 Rainfall level(mm/d)					
	<10	10～25	25～50	50～100	100～250	＞250
降雨天数 Days of rainfall	120	31	22	14	3	0
降雨天数百分比 Percentage of rainfall days(%)	63.16	16.32	11.58	7.37	1.58	0
降雨量 Rainfall/mm	418.8	541.2	830.8	922.2	408.2	0

降雨量百分比 Percentage of rainfall	13.42	17.34	26.62	29.55	13.08	0

3.2 岩溶石山区植被水文过程中 TOC 浓度的月动态

在降雨通过大气-植被-土壤/岩石的过程中，TOC浓度发生了改变。在观测期间，大气降水的TOC平均浓度为3.05±2.12 $mg·L^{-1}$。降雨时，空气中悬浮的含碳颗粒随雨水沉积，降雨不仅会淋洗粘附在植物体表面的有机碳，而且会淋洗由于植物体和附着在植物体上的微生物分泌的部分有机碳，以及小动物的尸体。在香椿林中，TOC 的平均浓度表现为香椿树干径流（8.96±3.77 $mg·L^{-1}$）<香椿穿透雨（6.40±3.99 $mg·L^{-1}$）< CF18(6.07±2.17 $mg·L^{-1}$）< 泉水（5.18±1.56 $mg·L^{-1}$），在云实灌丛中，TOC 的平均浓度表现为云实树干径流（15.63±6.11 $mg·L^{-1}$）<云实穿透雨（15.03±7.47 $mg·L^{-1}$）< CF16(6.40±1.96 $mg·L^{-1}$) <泉水（5.18±1.56 $mg·L^{-1}$）。大气降水进入森林后,碳浓度的增加是由于降水对叶面的淋洗（McDowell & Likens,1988）和淋溶(Turkey et al,1970),因而林冠层结构和组成是影响穿透水TOC浓度的主要因素。香椿林作为西南岩溶石山区植被恢复的先锋林,其林冠结构单一，郁闭度低，其分泌物的种类和组成相对比较简单,且香椿为落叶树种，树叶表面沉积的有机颗粒少。雨水对云实灌丛的淋洗和淋溶能力比香椿林大，主要是因为云实灌丛树叶茂密，郁闭度和叶面积指数大，且树皮开裂，叶片粗糙且多毛，也可能与其分泌特性有关。穿透雨和树干径流作为两个分量进入表层岩溶带后，经过裂隙土/岩石的吸附和微生物降解等，TOC浓度下降，经过长距离的水岩相互作用后，泉水的TOC浓度继续下降。

在TOC月浓度动态变化方面，由图2可以看出,年内降雨TOC浓度月变化不大，变幅较小，而两个林份树干径流和穿透雨的TOC浓度月变化较大，总体上呈现雨季高于旱季的趋势。穿透雨、树干径流中TOC 浓度在6月份开始增加，9月份TOC浓度达到最大值，至11月,由于雨季时植物体表面聚集的有机碳颗粒被冲刷和淋溶,积聚在树皮和树叶的有机物越来越少,因此,穿透雨和树干径流中的TOC浓度降低。钻孔水和泉水的TOC浓度月变化与穿透雨和树干径流的TOC浓度月变化一致。

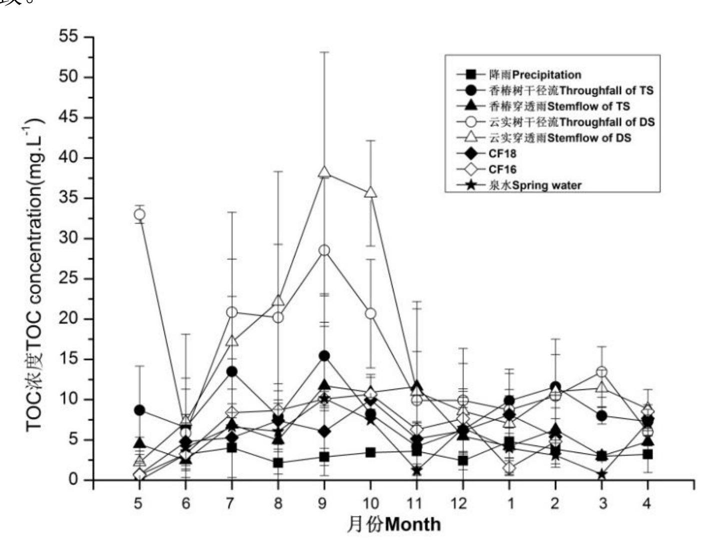


图2 裸露型岩溶区植被水文过程中总有机碳浓度月动态

Fig.2 Monthly variation of TOC concentrations for hydrological process in

exposed karst area

在降雨通过大气-植被-土壤/岩石各层次的过程中，TOC浓度的增幅也不同（表3），这与雨强、降雨持续时间、冠层结构、表层岩溶带的结构有关。在观测期间，两个林分的穿透雨和树干径流TOC浓度的平均增量和变化幅度较大，而且尤以灌丛的TOC浓度平均增量和变化幅度最大。钻孔水和泉水TOC浓度的平均增量和变化幅度比穿透雨和树干径流的小。

表 3 穿透雨和树干径流 TOC 浓度的相对增量(%)

Table 3 Relative increment of TOC concentration in throughfall and stemflow (%)

项目 Items	穿透雨 Throughfall TS	穿透雨 Throughfall CD	树干径流 Stemflow TS	树干径流 Stemflow CD	钻孔 CF18 BoreholeCF18	钻孔 CF16 BoreholeCF16	泉水 Spring water
平均增量 Average increment	471.20	1 420.55	760.95	1 301.07	570.55	670.60	572.69
最大增量 Maximum increment	2 015.62	5 089.65	3 156.36	4 691.12	1 177.86	1 614.23	10 743.00
最小增量 Minimum increment	14.64	147.09	16.17	12.70	214.42	2.77	47.75
变化幅度 Variation increment	2 000.99	4 942.56	3 140.19	4 678.43	963.43	1 611.46	1 026.25

注：DOC 相对增量= (穿透雨或树干径流或钻孔水TOC 浓度－大气降水TOC 浓度) /大气降水TOC 浓度× 100%。

Note: Relative increment = (DOC concentration in throughfall or stemflow － concentration in precipitation) /DOC concentration in precipitation × 100%.

3.3 香椿林和云实灌丛有机碳浓度与水量的相关性

从图3可以看出，香椿林树干径流TOC 浓度与树干径流量呈负相关关系，而云实灌丛树干径流TOC浓度与树干径流量无显著相关关系。香椿林和云实灌丛穿透雨TOC 浓度与其相应的穿透雨量亦无显著相关关系。

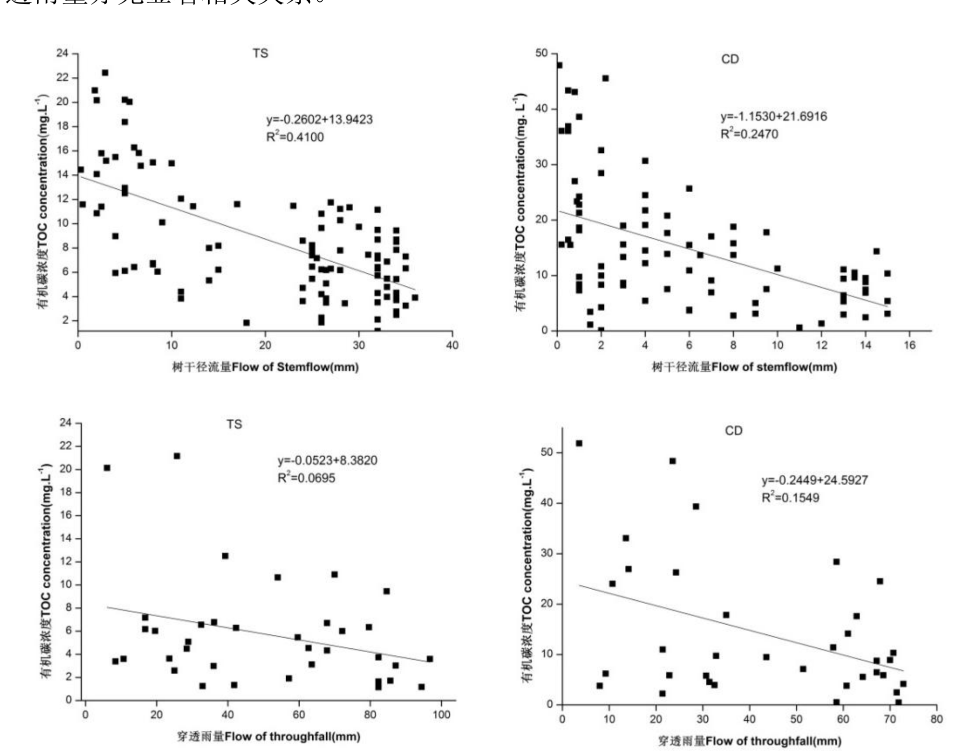


图3 香椿林和云实灌丛树干径流和穿透雨TOC 浓度与其相应水量的相关性

Fig. 3 Correlations between TOC concentrations and its water yield in stemflow and throughfall in TS and CD plantation.

3.4 岩溶石山区大气-植被-土壤/岩石系统各作用层的 TOC 通量

在降水接触植被表面、枯落物、土壤和岩石时，都会发生TOC的淋溶、吸附和吸收等过程，加之水量变化，造成了TOC 通量在各作用层的差别。由图4可以看出，观测期间降雨的月TOC平均通量为云实穿透雨(16.68 kg·hm^{-2})>香椿穿透雨(8.73 kg·hm^{-2})>降雨(5.25 kg·hm^{-2})>泉水(4.02 kg·hm^{-2})>香椿树干径流(0.59 kg·hm^{-2})>云实树干径流(0.38 kg·hm^{-2})。

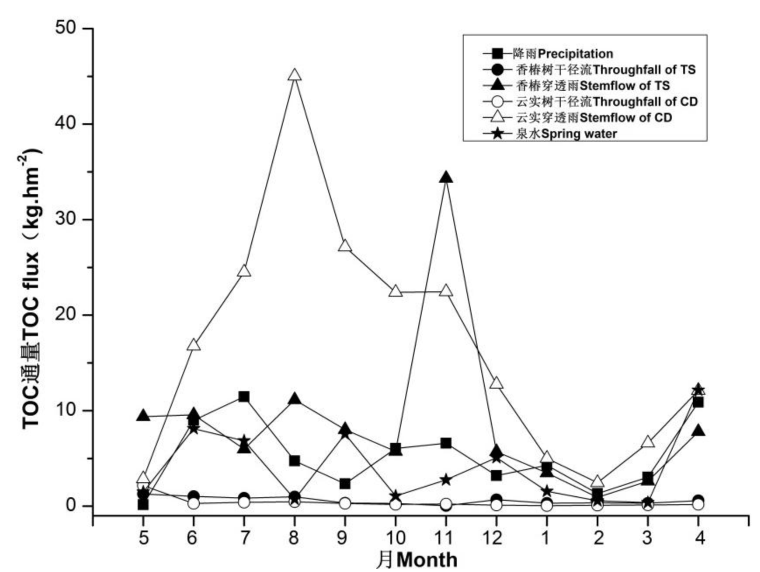


图 4 裸露型岩溶区植被样地不同作用层的 TOC 通量月动态特征

Fig. 4 Monthly variation of TOC flux at each vegetation layer in exposed karst area

林下降雨和林外降雨携带的TOC通量差值可以指示降雨对植被冠层和树干的淋溶程度。香椿林和云实灌丛林下降雨携带年TOC通量相对林外降雨均有不同程度的增加，香椿林和云实灌丛的TOC通量分别增大了48.75 kg·hm^{-2}和170.67 kg·hm^{-2}（表4），说明降雨经过植被冠层和树干的淋溶,TOC通量为净增加。泉水与林下降雨携带的TOC通量的差值可以指示表层岩溶带对输入林地的TOC通量的作用。泉水携带的年TOC通量（63.06 kg·hm^{-2}）比香椿林和云实灌丛林下降雨携带的TOC通量低。香椿林和云实灌丛林下降雨经过表层岩溶带后，经过表层岩溶带的吸附、微生物降解等，泉水携带的TCO通量（48.29 kg·hm^{-2}）分别降低了0.46 kg·hm^{-2}和122.38 kg·hm^{-2}，说明表层岩溶带具有TOC的净吸附或净储存的“汇”作用。

表 4 裸露型岩溶植被样地水文转化过程中不同作用层的 TOC 通量差别(kg·hm^{-2})

Table 4 Difference of TOC flux at each vegetation layer in exposed karst area

时间 Time	TS/林下降雨-林外降雨 Rainfall under canopy-precipitation	CD/林下降雨-林外降雨 Rainfall under canopy-precipitation	TS/泉水-林下降雨 Spring water-Precipitation	CD/泉水-林下降雨 Spring water-Precipitation
201505	10.51	4.99	-9.03	-3.51
201506	1.61	15.22	6.51	-7.10
201507	-4.63	19.97	11.47	-13.13

201508	7.38	43.79	-6.65	-43.06
201509	6.01	24.57	1.54	-17.02
201510	-0.01	19.14	1.09	-18.07
201511	27.78	21.05	-25.03	-18.30
201512	3.18	10.82	1.90	-5.74
201601	-0.47	0.76	2.03	0.80
201602	-0.05	-2.86	0.61	3.43
201603	-0.08	3.72	0.46	-3.34
201604	-2.48	9.48	14.63	2.67
合计 Total	48.75	170.67	-0.46	-122.38

4. 结论与讨论

4.1 西南岩溶石区大气-植被-土壤/岩石系统 TOC 浓度差异性分析

大气降雨中 TOC 的输入是表层岩溶带 TOC 的来源之一。在岩溶区大气-植物-土壤/岩石系统中，TOC 浓度的变化趋势为：树干径流>穿透雨>钻孔水>泉水>大气降雨。在广西桂林地区，大气降水的 TOC 浓度（3.05 mg·L^{-1}）高于广东鼎湖山（2.4 mg·L^{-1}）（罗艳等，2004；尹光彩等，2005）和一些国外温带森林研究成果（1.0-2.9 mg·L^{-1}）（Currie et al, 1996; Inagaki et al, 1995; McDowell et al, 1998;Liu & Bor, 2003），低于宁夏六盘山（7.34 mg·L^{-1}）（杨丽丽等，2014）和中国台湾关刀溪的研究成果（4.7 mg·L^{-1}）（Chiung et al,2003）。这与当地大气中悬浮的有机物颗粒数量有关。由于雨水对树叶和树干的淋洗和冲刷，大气降水传化为穿透雨和树干径流的过程中，TOC 浓度显著增大。在本研究中，树干径流的 TOC 浓度最高，变化在 0.11-45.56 mg·L^{-1}，低于其他地区的测定值范围（4.1-56.89 mg·L^{-1}）（Currie et al, 1996; Inagaki et al, 1995; McDowell et al, 1998;Liu & Bor, 2003;杨丽丽等，2014）。广西桂林丫吉试验区主要植被类型穿透雨的 TOC 浓度变化在 0.02-51.89 mg·L^{-1}，与广东鼎湖山（12.9-14.6 mg·L^{-1}）（尹光彩等，2005）、宁夏六盘山（11.05-21.92 mg·L^{-1}）（杨丽丽等，2014），中国台湾中部关刀溪（7.0-9.9 mg·L^{-1}）（Liu & Bor, 2003）和其他地区（3.1-33.9 mg·L^{-1}）地区相比，其 TOC 浓度变幅大，主要与树种和森林结构特征有关，还与桂林地区降雨强度和频度、雨季旱季分明的特点有关。桂林丫吉试验场香椿林和云实灌丛穿透雨较高的 TOC 总量不仅可为林下微生物生长提供大量的能量，也可增强微生物与植物体之间的生化相互促进作用。

在林下降水进入岩溶区土壤/岩石系统转化为钻孔水过程中，其 TOC 浓度变化与土壤厚度，枯落物数量与组成，岩石孔隙度等有关。桂林试验场岩溶区钻孔水的 TOC 浓度变化为 0.01-12.77 mg·L^{-1}，比宁夏六盘山（22.29-28.55 mg·L^{-1}）（杨丽丽等，2014）和广东鼎湖山（28.5 mg·L^{-1}）（尹光彩等，2005）枯落物渗漏水的 TOC 浓度低，但与广东鼎湖山（5.4-12.1 mg·L^{-1}）（尹光彩等，2005）和中国台湾关刀溪（7.7-11.0 mg·L^{-1}）（Chiung et al, 2003）的土壤渗漏水 TOC 浓度接近。主要是因为桂林丫吉试验场岩溶区枯落物数量少，土壤浅薄且土壤有机质含量低的原因。桂林丫吉试验场表层岩溶泉水的 TOC 浓度为 0.34-11.73 mg·L^{-1}，与钻孔水的 TOC 浓度较接近，但显著低于从林外降水到林下降水的各转换环节，说明表层岩溶带土壤/岩石系统对 TOC 的吸附和拦截作用不容忽视。

4.2 西南岩溶石山区大气-植被-土壤/岩石系统 TOC 通量

在降水经过大气-植被-土壤/岩石系统时，在不同树种和不同介质中会发生 TOC 的淋失、吸附和吸收等作用，且水量的不同造成 TOC 通量在各作用层的差别。相对于林外降水的 TOC 通量（63.06 kg·hm^{-2}），由穿透雨和树干径流组成的林下降雨的 TOC 通量在两个林分样地都增大了，表明植被类型的林冠层均有 TOC 净淋出作用，这与其他的研究相似。总体上看，桂林丫吉香椿林（153.48 kg·hm^{-2}）和云实灌丛（204.86 kg·hm^{-2}）的林下降雨的 TOC 通量比宁夏六盘水的五种森林（63.01-132.28 kg·hm^{-2}）和 1 种灌丛（79.49 kg·hm^{-2}）的 TOC 通量大，且灌丛的 TOC 净淋出作用最大，其原因可能是灌丛粗糙且多毛的树叶更有利于拦截和存储大量干沉降，且茂密的树叶也有利于昆虫的繁殖和生长，在野外采样的过程中，明显发现云实灌丛叶片上有较多的昆虫残留物。

在本研究中，丫吉表层岩溶泉水 TOC 通量为 48.29 kg·hm^{-2}，低于宁夏六盘山华山松林土壤渗漏水的 TOC 通量（66.33 kg·hm^{-2}）（杨丽丽等，2014），且远远低于枯落物渗漏水的 TOC 通量，说明表层岩溶带起着重要的吸收、过滤和固定 TOC 的“汇”作用。降水在大气-植被-土壤/岩石系统中的 TOC 通量变化，可以反映植被内部和表层岩溶带伴随雨水转化发生的碳转移过程。在广西桂林亚热带季风气候条件和裸露型岩溶区地质背景下，林冠层对林外降水输入 TOC 通量有净增加（淋溶和淋洗）作用，而表层岩溶带的土壤/岩石系统可大大降低林下降雨的 TOC 通量，起着净固定作用。

综上所述，大气降雨为岩溶生态系统输入一定数量的 TOC（“源”作用）。降雨进入植被内部后时，植被林冠层作为“TOC 活库”具有增加 TOC 通量的“源”作用，而土壤/岩石系统作为“TOC 死库”具有固定 TOC 的“库”作用。因此，在估算岩溶区碳转移时，需要充分考虑植被系统对 TOC 通量的净增加作用，如只是考虑大气降雨和泉水的 TOC 输入输出模型，会大大低估土壤-碳酸盐岩对 TOC 的固定作用。

参考文献

CHANG Y, WU JC, JIANG GH, et al. 2012. The impact of overland flow on the variation of discharge and hydrochemistry of karst spring in peak cluster [J]. Shuili Xuebao, 43(9): 1050-1057.[常勇，吴吉春，姜光辉，等. 2012. 峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J].水利学报, 43(9): 1050-1057.]

CHEN GF, JIANG GH, ZHOU WL, et al. 2013.Characteristics of moisture and evaporation on slope land soil profile in karst stone hill: a case in the Yaji experimental site[J]. Carsologica Sinica ,32(1):73-78. [陈国富，姜光辉，周文亮，等. 2013. 岩溶石山区坡地土壤剖面水分与蒸发特征—以桂林丫吉试验场为例[J]. 中国岩溶, 32(1):73-78.]

CURRIE W S, ABER J D, MCDOWELL W H, Boone R D． 1996. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term Namendments in pine and hardwood forests [J]. Biogeochemistry, 35(3) : 471-505.

DRISCOLL CT, BLETTE V, Yan C, et al. 1995. The role of dissolved organic carbon in the chemistry and bioavailability of mercury in remote Adirondack lakes[J]. Water Air Soil Pollut, 80:499-508.

ERLANDSSON M, BUFFAM I, FLSTER J, et al. 2008. Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate [J]. Glob Change Biol, 14(5) : 1191-1198.

FREEMAN C, EVANS C D, MONTEITH D T, et al. 2001. Export of organic carbon from peat soils [J]. Nature, 412(6849) : 785.

GREENBERG A E． 1992. Standard Methods for Examination of Waters and Watersheds． Washington，DC: American Public Health Association, 64(3 /4) : 51-59.

HOPE D, BILLETT M F, CRESSER M S. 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes [J]. Environ Pollut, 84: 301-324.

INAGAKI M, SAKAI M, OHNUKI Y. 1995. The effects of organic carbon on acid rain in a temperate forest in Japan [J]. Water Air Soil Pollu, 85(4) : 2345-2350.

JANSSON M, BERGSTROM AK, BLOMQVIST P, et al. 2000. Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton production relationships in lakes[J]. Ecology, 81 (11):3250-3255.

JIANG GH, ZHANG J.2011.Change of dissolved in organic carbon in karst peak cluster during natural restoration:a case study in Yaji station [J]. Carsologica Sinica, 30（4）: 397-402.[姜光辉，张强. 2011. 峰丛洼地自然封育过程岩溶水溶解无机碳的变化—以桂林丫吉试验场为例[J]. 中国岩溶, 30（4）: 397-402.]

KORTELAINEN P, MATTSSON T, FINER L, et al. 2006. Controls on the export of C， N， P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland [J]. Aquatic Sciences, 68(4) : 453-468.

LUO Y, ZHOU GY, ZHANG DQ, et al. 2004. Study on the concentration of total organic carbon in the forest hydrological processes of three main forest types in Dinghushan during a rain season [J]. Acta ecologica sinica, 24（12）:2973-2978.[罗艳，周国逸，张德强，等. 2004. 鼎湖山三种主要林型水文学过程中总有机碳浓度对比[J]. 生态学报，24（12）:2973-2978.]

LIECHTY HO, KUUSEOKS E, MORZ GD. 1995. Dissolve organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes [J]. J Environ Qual, 24:927-933.

LIU CP, BOR HS. 2003. Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and stream water at the Guandaushi subtropical forest in Taiwan [J]. For Ecol Man, 172:315-325.

MATTSSON T, KORTELAINEN P, RIKE A. 2005. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate [J]. Biogeochemistry, 76(2) : 373-394.

MCDOWELL WH. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest [J]. J Trop Ecol, 14(4) : 521-536.

MCDOWELL WH，LIKENS GE. 1988. Origin，composition，and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley [J]. Ecol Monogr, 58(3) : 177-195.

TURKEY H B. 1970. The leaching of substances from plants [J]. Annu. Rev. Plant Physiol., 21: 305- 324.

WANG QL, JIANG YJ, CHEN Y. 2016. Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors: An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing [J]. Environmental science, 37（5）: 1788-1797.[王巧莲，蒋勇军，陈宇. 2016. 岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析: 以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例[J]. 环境科学，37（5）: 1788-1797.]

WILCKE W, YASIN S, VALAREZO C, et al. 2001. Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador [J]. Biogeochemistry, 55:45-72.

YANG LL, WANG YH, DU M, et al. 2014. The variation of total organic carbon (TOC) flux with rain water in regional forests of Liupan Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(21) : 6297-6308.[杨丽丽，王彦辉，杜敏，等. 2014. 六盘山典型森林伴随降水的总有机碳(TOC)通量变化特征[J].生态学报, 34(21) : 6297-6308.]

YIN GC, ZHOU GY, ZHANG DQ, et al. 2005. Dynamics of total organic carbon(TOC)in hydrological processes in coniferous and broad-leaved mixed forest of Dinghushan [J].Chinese journal of applied ecology, 16(9) : 1655-1660.[尹光彩，周国逸，张德强，等. 2005. 鼎湖山针阔叶混交林水文学过程中总有机碳动态[J]. 应用生态学报，16(9) : 1655-1660.]

YUAN DX,DAI AD,CAI WT, et al.1996.Karst water system of a peak cluster catchment in south China’s bare karst region and its mathematic model[M].Guilin: Guangxi normal university press,88-118.[袁道先，戴爱德，蔡五田，等. 1996. 中国南方裸露型岩溶峰山区岩溶水系统及其数学模型的研究:以桂林丫吉为例[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 88-118.]

ZHANG CL, HUANG F, YANG H, et al. 2013. Characteristics of carbon cycle and the effect of carbon sink in karst

ecosystem [J].Earth and environment, 41(4): 378-387.[张春来，黄芬，杨慧，等. 2013. 岩溶生态系统中的碳循环特征与碳汇效应[J]. 地球与环境, 41(4): 378-387.]